

論文 超高強度コンクリートを用いたはりの曲げ・せん断挙動に関する実験的研究

望月 秀朗*¹・児島 孝之*²・高木 宣章*³・濱田 譲*⁴

要旨：圧縮強度800～1000kgf/cm²の超高強度コンクリートを用い、高プレストレスを導入したP R Cはりの曲げ・せん断挙動、曲げ靱性の改善について実験的に検討した。曲げスパンをスターラップと炭素繊維シートの両方で拘束補強することにより、はりの曲げ靱性を大きく改善することができる。土木学会「コンクリート標準示方書」のせん断耐力算定式を超高強度コンクリートを用いたR Cはりに適用すると、a/dによってはせん断耐力を過大評価することがある。

キーワード：超高強度コンクリート，P R Cはり，終局曲げ耐力，曲げ靱性，せん断耐力

1. はじめに

高強度コンクリートは、土木構造物では橋脚、桁、トラス部材、連続地下壁などに利用されている。しかし、曲げ部材では、コンクリートの圧縮強度の増加が直接的に部材の軽量化に結びつかないことや、軽量化できたとしてもそれに伴う部材の剛性不足による変形の増大などのために、高強度コンクリートの利用が進んでいないのが現状である。最近では、従来にない圧縮強度1000 kgf/cm²以上の超高強度コンクリートの現場施工が可能となり、これら超高強度コンクリートの利点を利用した桁高支間比の小さいプレストレスト鉄筋コンクリート(P R C)橋の実験施工も行われている[1]。しかし、高強度あるいは超高強度コンクリートを使用したP R C部材の破壊は、非常に脆性的であり、靱性を改善する必要性が指摘されている。

本研究では、圧縮強度800～1200kgf/cm²の超高強度コンクリートを使用し、200～280kgf/cm²の高プレストレスを導入したP R Cはりの曲げ挙動および靱性改善の方法について実験検討を行う。超高強度コンクリートを用いたR CおよびP R Cはりのせん断耐力についても検討を行う。

2. 実験概要

2.1 実験計画

実験計画および供試体名を表-1に示す。シリーズ1では超高強度コンクリート(1200kgf/cm²)を用いたP R Cはりの曲げ靱性の改善を検討するためにコンクリートの圧縮強度、曲げに対する補強量を一定として、導入プレストレス量、曲げスパン内の補強材の種類(スターラップ、炭素繊維シート)とその組合せ、補強量を要因とした。はり下縁のプレストレス量は0、100、200、250～280kgf/cm²の4水準とした。曲げスパンの拘束補強によるはりの曲げ靱性確保の検討は、導入プレストレス量200、280kgf/cm²のはりについて行った。スターラップおよび炭素繊維シートによる曲げスパンの横拘束度($p_w \cdot \sigma_w$)の算定には、式(1)を用いた。

*1 (株)熊谷組、工修(正会員)

*2 立命館大学教授 理工学部土木工学科、工博(正会員)

*3 立命館大学助教授 理工学部土木工学科、工博(正会員)

*4 ドーピー建設工業(株)、技術センター、工修(正会員)

$$P_w \cdot \sigma_w = P_y \cdot \sigma_y + P_{cf} \cdot \sigma_{cf} \quad (1)$$

$$P_y = \frac{2A_s}{b_1 \cdot s}, \quad P_{cf} = \frac{2b_{cf}}{b_w}$$

ここで、 σ_y ：スターラップの降伏強度

σ_{cf} ：炭素シートの引張強度

A_s ：スターラップ1本の断面積

b_1 ：スターラップの短辺長さ

b_w ：はりの断面幅

b_{cf} ：炭素シートの設計厚さ

s ：スターラップの間隔

表-1 供試体の名称、要因

シリーズ1：PRCはりの曲げ試験

供試体名	導入プレストレス量 (kgf/cm ²)	曲げスパン内のスターラップ ^o	炭素シートの目付量 (g/m ²)	横拘束度 $P_w \cdot \sigma_w$ (kgf/cm ²)	コンクリート f'_c (kgf/cm ²)
C0-0-0	0	—	—	0	B
C0-0-10	100	—	—	0	A
C0-0-20	200	—	—	0	A
C0-8D6-20		D6@8cm	—	34.30	B
C0-5D6-20		D6@5cm	—	54.60	B
C0-8D10-20		D10@8cm	—	83.02	B
C0-5D10-20		D10@5cm	—	132.99	B
C2-0-20		—	200	46.08	B
C3-0-20		—	300	69.12	B
C2-5D6-20	D6@5cm	200	100.68	B	
C0-0-25	250	—	—	0	A
C3-0-28	—	—	300	69.12	B
C2-5D6-28	D6@5cm	200	100.68	B	
C0-5D10-28	D10@5cm	—	132.99	B	

シリーズ2では、超高強度コンクリート A、B：コンクリートの載荷試験時圧縮強度 A=1240kgf/cm²、B=1140kgf/cm²

を用いたせん断補強をしていないRCはりおよびPRCはりのせん断耐力について検討した。コンクリートの圧縮強度、せん断スパン有効高さ比(a/d)と導入プレストレス量を要因とした。コンクリートの圧縮強度は、800、1200kgf/cm²の2水準とした。

シリーズ2：RCはりおよびPRCはりのせん断試験

供試体名	コンクリートの強度 (kgf/cm ²)	導入プレストレス量 (kgf/cm ²)	a/d
RC-8	800	—	2.0、2.5、3.0
RC-12	1200	—	—
PRC-8	800	200	2.0、3.0、4.0
PRC-12	1200	250	—

PRCはりの導入プレスト

表-2 コンクリートの示方配合

レス量は、コンクリートの圧縮強度800kgf/cm²と1200kgf/cm²に対して、各々200、250 kgf/cm²とした。

配合	シリーズ	W/(C+SF) (%)	s/a (%)	SF/(C+SF) (%)	単位量 (kg/m ³)					高性能減水剤	消泡剤
					W	C	SF	S	G		
I	1、2	22	34	10	150	614	68	534	1072	34.1	1.71
II	2	32	38	10	155	436	48	655	1108	24.2	1.21

配合I 高性能減水剤：(C+SF)×5.0%、消泡剤：高性能減水剤×0.5%

配合II 高性能減水剤(β-ナフタリン系)：(C+SF)×1.8%

2.2 使用材料

コンクリートの示方配合を表-2に示す。セメントには早強ポルトランドセメントを、粗骨材の最大寸法は13mmのものを使用した。コンクリートの高強度化を図るためシリカフュームを結合材質量の内割で10%使用した。配合Iでは、高性能減水剤(主成分：ポリカルボン酸系グラフトコポリマー)と消泡剤は、各々結合材質量の5.0%、高性能減水剤質量の0.5%使用した。配合IIでは、β-ナフタリン系の高性能減水剤を使用した。載荷試験時のコンクリートの力学的特性を表-3に示す。シリーズ1、2で使用した鋼材の機械的性質を表-4に、シリーズ1で使用した炭素繊維シートの力学的特性を表-5に示す。シリーズ1のPRCはりでは、φ26のPC鋼棒(SBPR110/125)、引張側軸方向鉄筋にD16(SD345)を、圧縮側軸方向鉄筋にD10(SD345)を使用した。

表-3 コンクリートの力学的特性

目標強度	f'_c	f_t	f_t	$E_c \times 10^5$
1200 A*	1240	101	74	5.0
1200 B*	1140	113	67	4.8
800	880	109	56	4.3

*：A、Bは打設日が異なる

(単位：kgf/cm²)

表-4 鋼材の機械的性質

種類	PC鋼棒	異形鉄筋		
呼び径(mm)	26.21	6	10	16
降伏強度(kgf/cm ²)	11540	3500	4030	3940
引張強度(kgf/cm ²)	12600	5530	5870	5760
弾性係数(kgf/cm ²)	2069000	2.1×10 ⁸		
伸び(%)	8.0	16.1	24.2	22.8

表-5 炭素繊維シートの力学的特性

目付量 (g/m ²)	比重	設計厚さ (mm)	引張強度 (kgf/cm ²)	弾性係数 (kgf/cm ²)
200	1.84	0.1086	25600	4.42×10 ⁸
300	1.84	0.1629	(43000)	(4.45×10 ⁸)

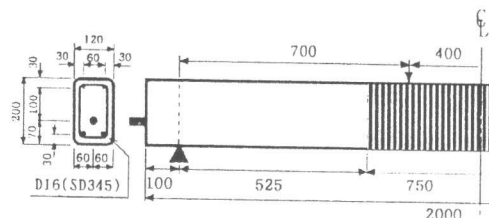
()内の数値は炭素繊維単体の特性

せん断補強筋にはD6(SD295)を、曲げスパン内のコンクリートの横拘束を高めるために補強材としてD6(SD295)、D10(SD345)および炭素繊維シート(高弾性タイプ、目付量200、300g/m²)を用いた。

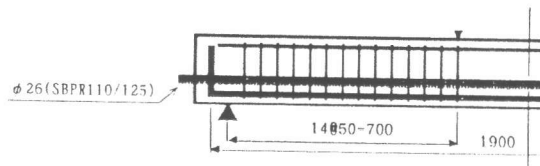
シリーズ2のRCはりでは、引張側軸方向鉄筋と圧縮側軸方向鉄筋はシリーズ1と同じものを使用した。シリーズ2のPRCはりでは、引張側軸方向鉄筋にD19(SD345)、圧縮側軸方向鉄筋および緊張材はシリーズ1と同じものを使用した。

2.3 供試体および試験方法

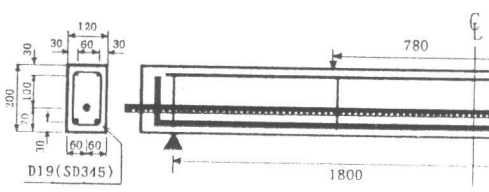
供試体寸法、配筋および荷荷条件を図-1に示す。供試体は、シリーズ1、2とも矩形断面で寸法が12×20×200cmのものを使用した。シリーズ1の引張側軸方向鉄筋の有効高さを17cmとし、D16(SD345)を2本配置した。緊張材の位置は、はり下縁より7cmとし、 $\phi 26$ (SBPR110/125)のPC鋼棒を1本用いた。せん断補強筋として、D6(SD295)を5cm間隔で配置した。また、曲げスパン内に配置する補強材として、D10(SD345)またはD6(SD295)を各々5cmまたは8cm間隔で用いた。炭素シートで曲げスパンを補強する供



a) 荷荷条件および炭素繊維シート貼付位置



b) 曲げ試験の供試体例(C0-0-20)



c) せん断試験の供試体例(a/d=3)

図-1 供試体寸法および荷荷条件 (単位: mm)

試体は、断面の隅角部に半径1cmの面取りを設け、はり中央75cmの区間にはり断面全面に巻き付けた。炭素シートは、繊維方向をはり軸方向に対して直角となるように配置し、1層巻きで底面で約10cmのオーバーラップを設けた。炭素シートの接着にはエポキシ樹脂系接着剤を使用した。荷荷条件は、支持スパン180cm、曲げスパン40cmの2点集中荷荷とし、引張側軸方向鉄筋に対する a/d は4.1とした。荷荷方法は、最大荷重までは荷重制御とした。最大荷重以降は、引張鉄筋降伏時から最大荷重時までの増加変位の正数倍の変位まで各1回ずつ順次繰り返し荷荷を行った。

シリーズ2のRCはりでは、引張鉄筋とその径、有効高さはシリーズ1と同じとし、せん断破壊が先行するよう3本使用した。PRCはりでは、引張鉄筋の有効高さ、本数および緊張材の種類と位置はシリーズ1と同じとし、せん断破壊が先行するよう引張鉄筋としてD19(SD345)を2本使用した。荷荷条件は、RCはりでは引張側軸方向鉄筋に対する a/d で2.0、2.5、3.0、PRCはりでは2.0、3.0、4.0とした。シリーズ1およびシリーズ2のPRCはりのプレストレスの導入は、材令7日でポストテンション方式で行った。

表-6 曲げ試験結果

供試体名	σ_{pc} (kgf/cm ²)	構造束度 $p_w \cdot \sigma_w^*$ (kgf/cm ²)	ひびわれ発生荷重 P_{cr}^{**} (tf)			終局耐力 P_u (tf)						
			実験値	理論値	実/理	方法1		方法2		方法3		
						土木学会	実/理	三角2500 $\mu\epsilon$	実/理	SP指針(案)***	実/理	
C0-0-0	8	0	2.66	3.53	0.75	17.69	19.81	0.89	16.88	1.05	17.06	1.04
C0-0-10	93	0	6.00	5.40	1.11	21.70	22.21	0.98	18.77	1.16	19.40	1.12
C0-0-20	158	0	8.50	7.24	1.17	21.40	23.34	0.92	20.28	1.06	20.84	1.03
C0-8D6-20	177	34.30	8.20	7.96	1.03	21.01	22.91	0.92	20.60	1.02	20.78	1.01
C0-5D6-20	184	54.60	8.25	8.15	1.01	22.75	23.04	0.99	20.78	1.09	20.95	1.09
C0-8D10-20	190	83.02	8.10	8.31	0.97	23.25	23.14	1.00	20.93	1.11	21.10	1.10
C0-5D10-20	182	132.99	8.00	8.08	0.99	24.10	22.99	1.05	20.71	1.16	20.88	1.15
C2-0-20	162	46.08	8.50	7.86	1.08	25.60	22.27	1.15	20.05	1.28	20.15	1.27
C3-0-20	164	69.12	8.50	7.92	1.07	24.80	22.30	1.11	20.11	1.23	20.20	1.23
C2-5D6-20	169	100.68	8.50	8.07	1.05	24.25	22.40	1.08	20.24	1.20	20.33	1.19
C0-0-25	224	0	10.50	9.09	1.16	23.10	24.03	0.96	22.01	1.05	22.52	1.03
C3-0-28	239	69.12	11.50	10.05	1.14	26.40	23.77	1.11	22.14	1.19	22.18	1.19
C2-5D6-28	243	100.68	12.00	10.16	1.18	25.95	23.21	1.12	22.25	1.17	22.29	1.16
C0-5D10-28	254	132.99	11.25	10.11	1.11	23.25	23.46	0.99	22.67	1.03	22.81	1.02

*: $p_w \cdot \sigma_w = p_y \cdot \sigma_y + p_{cf} \cdot \sigma_{cf}$, **: 簡易法 $M_{cr} = (\sigma_{pe} + f_b) \cdot I_y$, ***: シリカフェームを用いたコンクリートの設計・施工指針(案)

3. 実験結果および考察

3.1 曲げ試験

(1) 終局曲げ耐力

静的試験結果を表-6に示す。圧縮部コンクリートの応力分布の仮定方法を図-2に示す。部材の終局曲げ耐力は、3種類の方法で算定した。方法1は土木学会「コンクリート標準示方書・設計編」[2]による等価応力ブロック法である。方法2では圧縮部コンクリートの応力分布を三角形分布と仮定して求めた。コンクリートが高強度になると最大応力時のひずみは若干大きくなるが、方法2ではコンクリートの高強度化に伴う脆性的な破壊を考慮して 2500μ とした。方法3は、土木学会「シリカフェームを用いたコンクリートの設計・施工指針(案)」[3]による終局曲げ耐力の算定式を用いた。本設計・施工指針(案)では、コンクリートの材料係数として1.5を採用している。しかし、本論文では方法1~3ともコンクリートの材料係数は1.0とし、コンクリートおよび鋼材の特性値は実測値を用いた。

終局曲げ耐力の計算値に対する実験値の比は、方法1で0.89~1.12、方法2では1.03~1.28、方法3では1.01~1.27となった。曲げスパンの横拘束度が圧縮部コンクリートの応力状態に及ぼす影響を本論文では考

慮しておらず、終局曲げ耐力算定に圧縮鉄筋を考慮している影響もあり、土木学会「コンクリート標準示方書」算定式(方法1)による計算値が実験値を上回る場合があった。しかし、圧縮強度 $800\sim 1000\text{kgf/cm}^2$ のコンクリートを対象とした土木学会「シリカフェームを用いたコンクリートの設計・施工指針(案)」算定式(方法3)による計算値は実験値をかなりの精度で推定している。

(2) 破壊性状および変形状

代表的な荷重-たわみ曲線を図-3に示す。荷重-たわみ曲線は繰り返し載荷時の包絡線を示す。

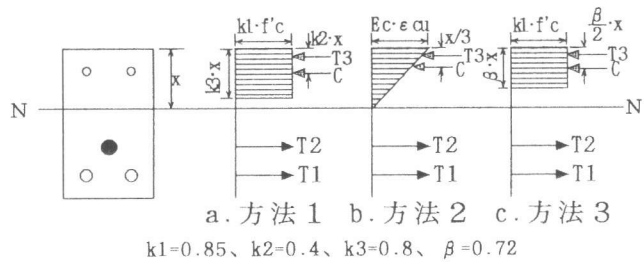


図-2 圧縮部コンクリートの応力分布の仮定

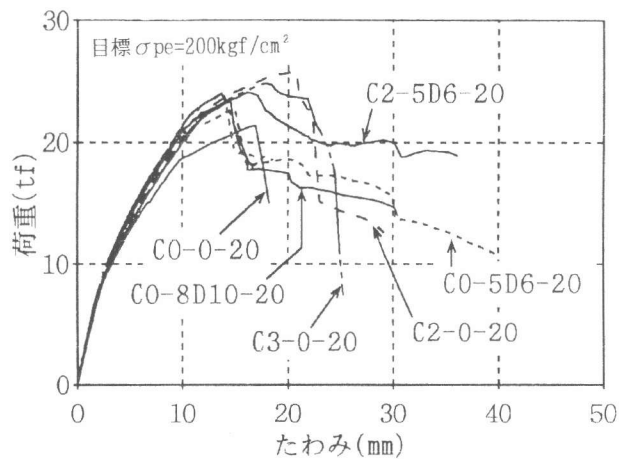


図-3 荷重-たわみ曲線

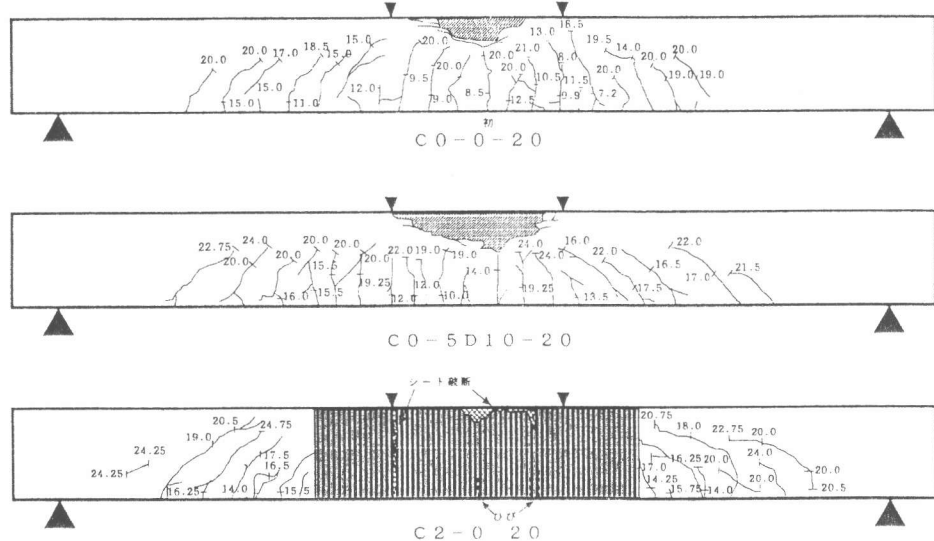


図-4 ひびわれ状況図

全てのはりが、引張鉄筋降伏後、圧縮部コンクリートの圧壊により破壊した。一例を除き、最大荷重に達したときP C鋼棒は降伏していない。P C鋼棒が降伏したC0-5D10-28は、降伏とほぼ同時に圧縮部コンクリートが圧壊して急激に破壊した。

曲げスパン内を補強していない供試体は、最大荷重時に圧縮部コンクリートが爆裂し、その後急激な荷重の低下がみられた。炭素繊維シートのみで補強した供試体は、最大荷重時にはり上縁の面取り部でシートが破断すると同時に圧縮部コンクリートが圧壊し、その後は補強していない供試体ほどの急激な荷重低下はないものの、エネルギー吸収能力は小さい。スターラップのみで補強した供試体は、圧縮部コンクリートの圧壊によりかぶりコンクリートが剥落し荷重が低下するが、最大荷重の80%程度の荷重を一旦は保持するものの、変形の増加に伴い荷重は順次低下する。

スターラップとシートの両方で補強した供試体は、最大荷重時にシートが破断し、スターラップのみで補強した供試体と同様に圧縮部コンクリートの圧壊によりかぶりコンクリートが剥落し荷重が低下するものの、変形がかなり大きくなっても最大荷重の80%程度の荷重を保持することができ、靱性が改善された。横拘束度がほぼ同じスターラップのみで補強された供試体より、靱性改善効果が著しい傾向にある。

終局曲げ耐力と横拘束度の関係の一例を図-5に示す。曲げスパンの横拘束度が大きくなると、終局曲げ耐力は一般に増加する傾向にある。これは、横拘束することにより、コンクリートの見かけの圧縮強度が増加するためと考えられる。スターラップよりシートによる横拘束の方が、終局曲げ耐力に及ぼす効果が大きい。本実験の目付量200と300g/m²の炭素繊維シートでは、終局曲げ耐力の増加は15~20%であった。

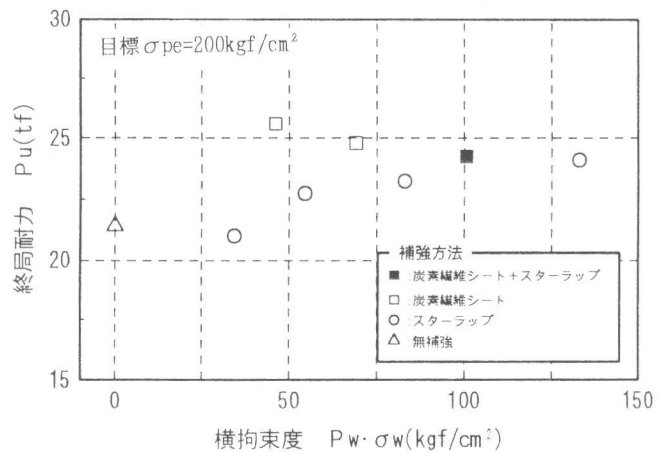


図-5 終局曲げ耐力と横拘束度の関係

3.2 せん断耐力

せん断試験結果を表-7に、図-6にせん断耐力の実験値と計算値の比とa/dの関係を示す。RCはりの破壊形式は、コンクリートの圧縮強度にかかわりなく、a/dが2.0ではせん断圧縮破壊、a/dが2.5と3.0では斜め引張破壊となった。PRCはりの破壊形式は、引張側軸方向鉄筋に対するa/dにかかわりなく、斜め引張破壊であった。せん断耐力は、式(2)と式(3)で算定した。

表-7 せん断試験結果

供試体名	a/d	P _{cr} (tf)	V _{cd} (tf)	実験値	P _u (tf)			
					式(2)		式(3)	
					理論値	実/理	理論値	実/理
RC12-2	2.0	4.30	7.75	16.20	12.79	1.27	8.45	1.92
RC12-2.5	2.5	7.50	7.50	8.73	11.56	0.76	8.45	1.03
RC12-3	3.0	6.50	6.50	7.40	10.73	0.69	8.45	0.88
RC8-2	2.0	3.75	7.50	17.65	11.87	1.49	7.84	2.25
RC8-2.5	2.5	3.00	7.00	8.50	10.72	0.79	7.84	1.08
RC8-3	3.0	2.70	6.00	8.29	9.96	0.83	7.84	1.06
PR12-2	2.0	19.00	17.50	36.80	21.38	1.72	14.12	2.61
PR12-3	3.0	14.50	23.00	28.30	17.96	1.58	14.13	2.00
PR12-4	4.0	10.00	17.00	21.90	16.31	1.34	14.20	1.54
PR8-2	2.0	16.25	22.50	30.10	19.10	1.58	12.61	2.39
PR8-3	3.0	12.00	17.25	19.55	16.20	1.21	12.75	1.53
PR8-4	4.0	8.50	15.50	16.30	15.70	1.04	13.66	1.19

ここで、P_{cr}:曲げひびわれ発生荷重、V_{cd}:斜めひびわれ発生荷重
P_u:終局耐力

$$\tau_c = 0.94 \cdot f'_c{}^{1/3} \cdot (100p_w)^{1/3} \cdot (100/d)^{1/4} \cdot \left(0.75 + \frac{1.4}{a/d}\right) \cdot \beta_n \quad \text{、} \quad V_{cd} = \tau_c \cdot b_w \cdot d \quad (2)$$

$$\tau_c = 0.9 \cdot f'_c{}^{1/3} \cdot (100p_w)^{1/3} \cdot (100/d)^{1/4} \cdot \beta_n \quad \text{、} \quad V_{cd} = \tau_c \cdot b_w \cdot d \quad (3)$$

ここに、 $\beta_n = 1 + M_0/M_u$ M_0 : テンションモーメント、 M_u : 終局曲げモーメント

式(3)は土木学会「コンクリート標準示方書・設計編」のせん断耐力算定式であり、式(2)はその基本式である。 a/d を考慮した式(2)を用いて計算したせん断耐力は、圧縮強度 $700\sim 800\text{kgf/cm}^2$ のコンクリートを用いたRCはりに適用できる[4][5]、しかし、圧縮強度 1000kgf/cm^2 以上のコンクリートを用いたRCはりに適用すると過大評価になること[5]が報告されている。本実験では、圧縮強度 880 と 1140kgf/cm^2 のコンクリートを使用した。 a/d によっては従来の報告同様、式(2)はRCはりのせん断耐力を過大評価する結果となった。PRCはりでは、超高強度コンクリートを用いても、算定式にかかわらずせん断耐力は安全側となった。せん断耐力へのプレストレスの影響は、一般に係数 β_n で考慮される。しかし、高強度コンクリートで導入プレストレス量が大きくなると、係数 β_n はせん断耐力を過小評価する傾向にある。

4. 結論

超強強度コンクリートを用いたRCおよびPRCはりの曲げ、せん断に関する本研究により得られた結果は以下のとおりである。

- (1)終局曲げ耐力は、土木学会「シリカフェームを用いたコンクリートの設計・施工指針(案)」算定式により良好な精度で推定することができる。
- (2)曲げスパンをスターラップとシートの両者で拘束補強することにより、はりの曲げ靱性を改善することができる。
- (3)土木学会「コンクリート標準示方書」のせん断耐力算定式をRCはりに適用すると、 a/d によってはせん断耐力を過大評価することがある。

謝辞

本研究において使用した炭素繊維シートは、ショーボンド建設(株)より提供して頂きました。ここに記して感謝の意を表します。

参考文献

- [1]三井 他：高強度コンクリートの施工-CNTスパーブリッジの施工-、コンクリート工学、Vol.32、No.7、pp.45-50、1994
- [2]土木学会：コンクリート標準示方書〔設計編〕、pp.50-54、1991
- [3]土木学会：コンクリートトライアブル-80 シリカフェームを用いたコンクリートの設計・施工指針(案)、pp.42-43、1995
- [4]土木学会：コンクリートトライアブル-79 コンクリート技術の現状と示方書 改訂の動向、pp.115-117、1994
- [5]松井 他：超高強度コンクリートを用いたRCはり部材のせん断耐力に関する研究、コンクリート工学年次論文報告集、Vol.17、No.2、pp.655-660、1995

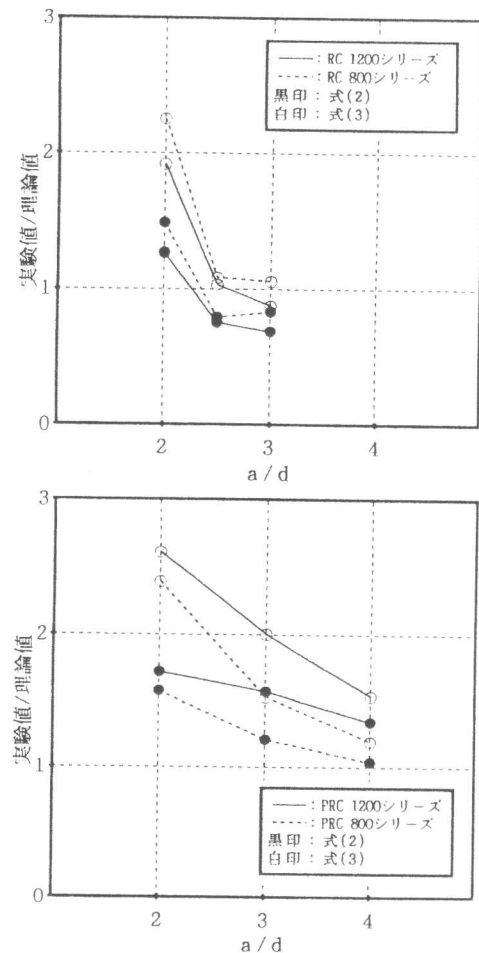


図-6 実験値と計算値の比と a/d の関係